



# **Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN**

**Institutskolloquium der Physik und Chemie, TU Ilmenau**

**Frank Siegert**

**Ilmenau, 13.01.2015**

# Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN

- 1** Einleitung
- 2** Die Theorie dahinter  
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 3** Die "Weltmaschine" am CERN  
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 4** Präzise Theorievorhersagen
- 4** Zusammenfassung und Ausblick

# Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN

- 1 Einleitung
- 2 Die Theorie dahinter  
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 3 Die "Weltmaschine" am CERN  
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 4 Präzise Theorievorhersagen
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

# Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN

- 1 Einleitung
- 2 Die Theorie dahinter  
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 3 Die "Weltmaschine" am CERN  
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 4 Präzise Theorievorhersagen
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

# Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN

- 1 Einleitung
- 2 Die Theorie dahinter  
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 3 Die "Weltmaschine" am CERN  
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 4 Präzise Theorievorhersagen
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

# Teilchenphysik mit dem Large Hadron Collider am CERN

- 1 Einleitung
- 2 Die Theorie dahinter  
Standardmodell im Schnelldurchgang
- 3 Die “Weltmaschine” am CERN  
Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor
- 4 Präzise Theorievorhersagen
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

## Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt  
Im Innersten zusammenhält”

Goethe

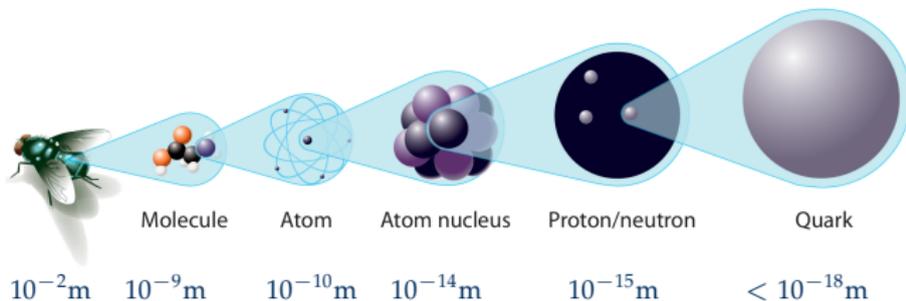
- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

## Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt  
Im Innersten zusammenhält”

Goethe

- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen



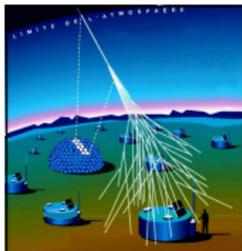
## Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt  
Im Innersten zusammenhält”

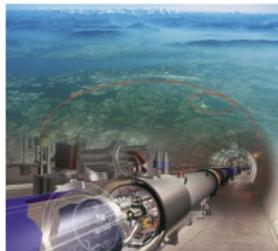
Goethe

- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

## Wie?



Astroteilchen



Beschleuniger



Flavour/Neutrinos

...

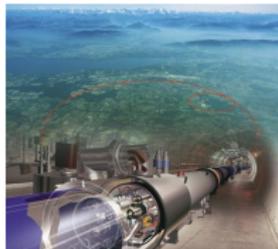
## Warum Teilchenphysik?

“Daß ich erkenne, was die Welt  
Im Innersten zusammenhält”

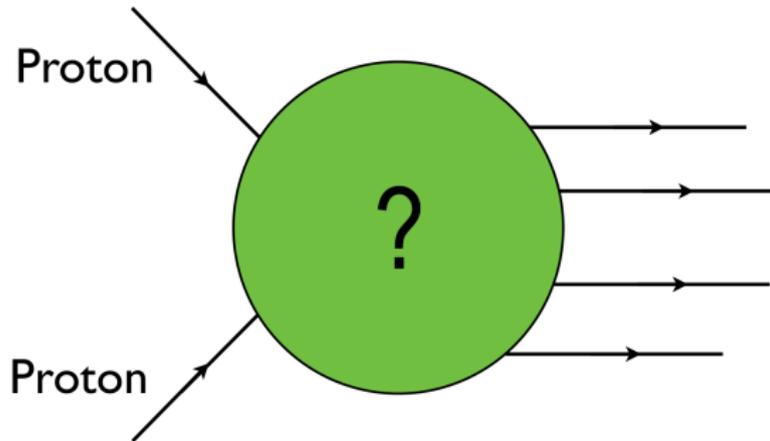
Goethe

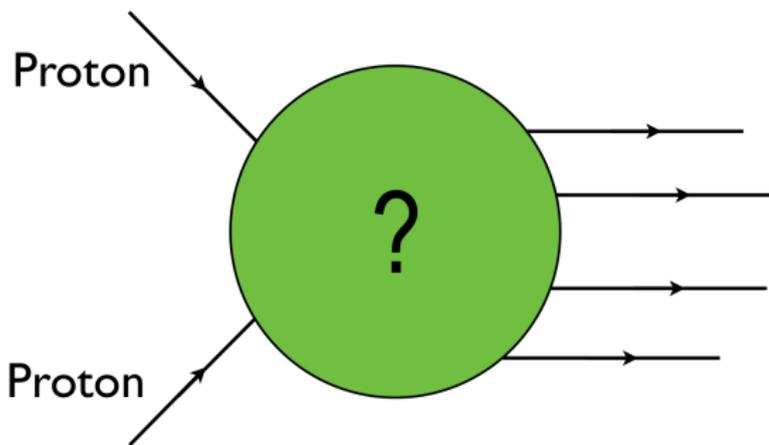
- Fundamentale Bausteine der Materie
- Deren fundamentale Wechselwirkungen

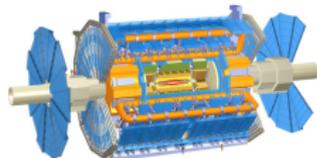
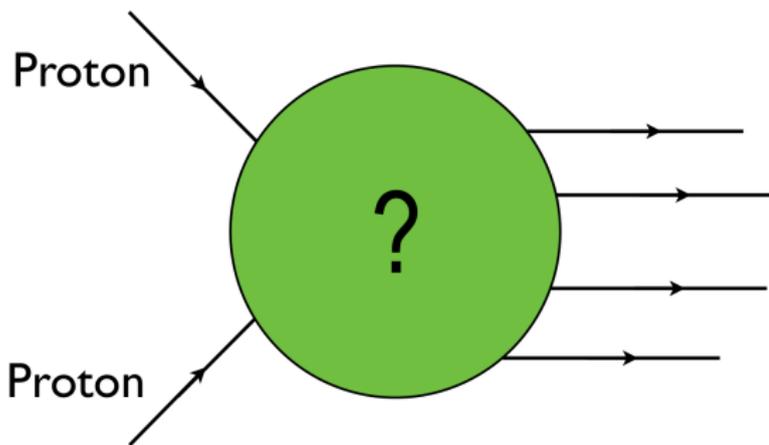
## Wie?

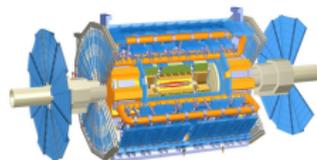
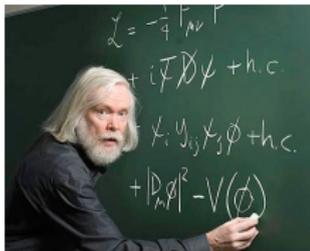
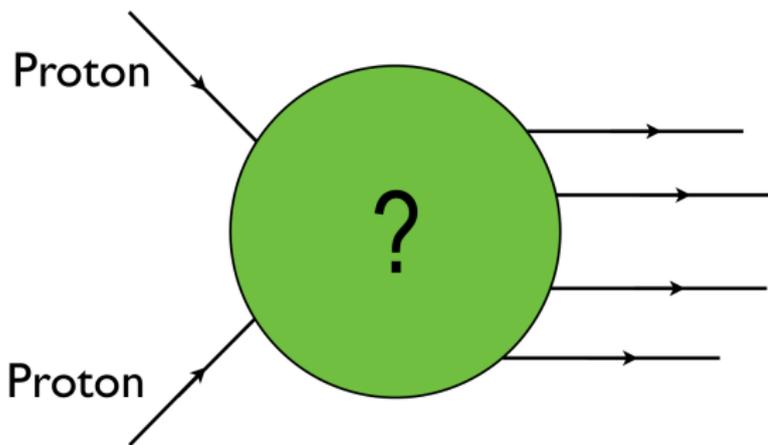


Beschleuniger



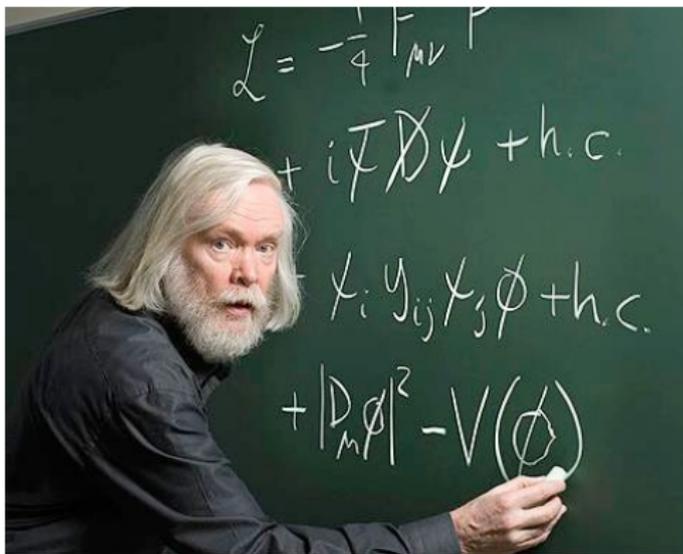






## Eine Preise Theorie

### Das Standardmodell im Schnelldurchgang



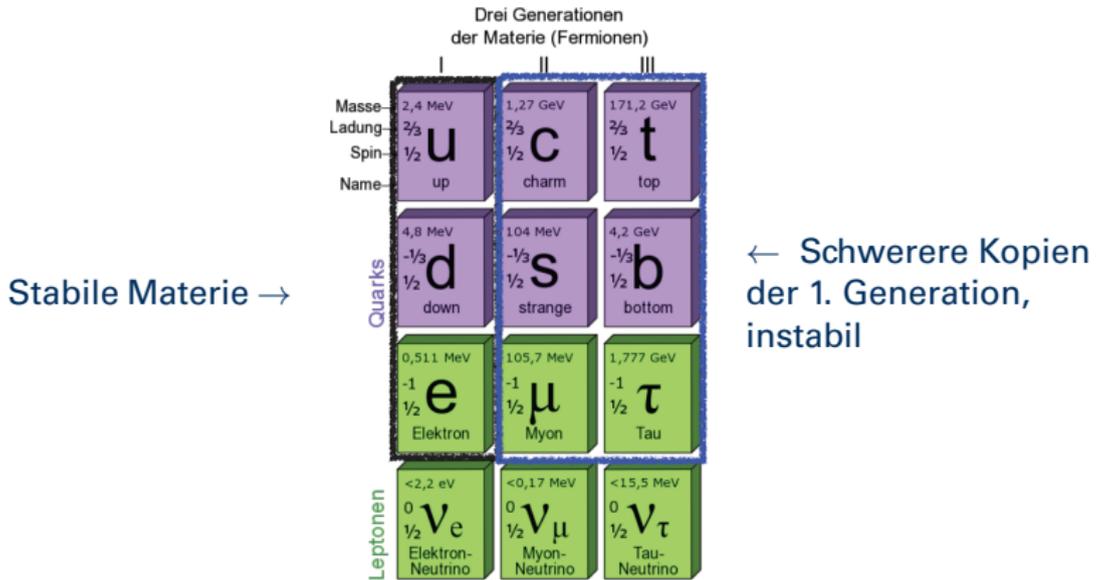
## Fundamentale Bausteine der Materie

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau- Neutrino
Leptonen			

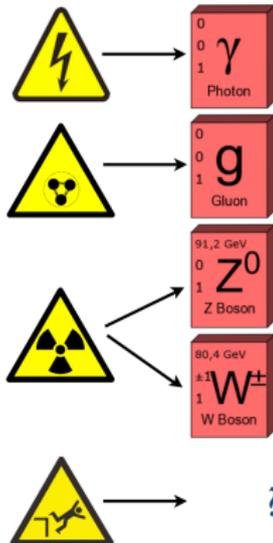
- Materieteilchen tragen Spin 1/2 (= Fermionen)

## Fundamentale Bausteine der Materie



- Materieteilchen tragen Spin 1/2 (= Fermionen)

## Wechselwirkungen



- Austauschteilchen tragen Spin 1 (= Bosonen)

## **Mathematischer Aufbau des Standardmodells** (Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$
- Lokale Eichsymmetrie bedingt zusätzliche bosonische Felder = Wechselwirkungen:

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$
- Lokale Eichsymmetrie bedingt zusätzliche bosonische Felder = Wechselwirkungen:
  - Fordere Invarianz unter lokaler Phasentransformation  $\psi' = \psi \cdot e^{i\chi(\vec{x}, t)}$   
(analog zu QM:  $|\psi|^2 = |\psi'|^2$ )

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$
- Lokale Eichsymmetrie bedingt zusätzliche bosonische Felder = Wechselwirkungen:
  - Fordere Invarianz unter lokaler Phasentransformation  $\psi' = \psi \cdot e^{i\chi(\vec{x}, t)}$   
(analog zu QM:  $|\psi|^2 = |\psi'|^2$ )
  - Problem: Freie Dirac-Glg  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - \frac{mc}{\hbar}) \psi = 0$  nicht invariant!

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

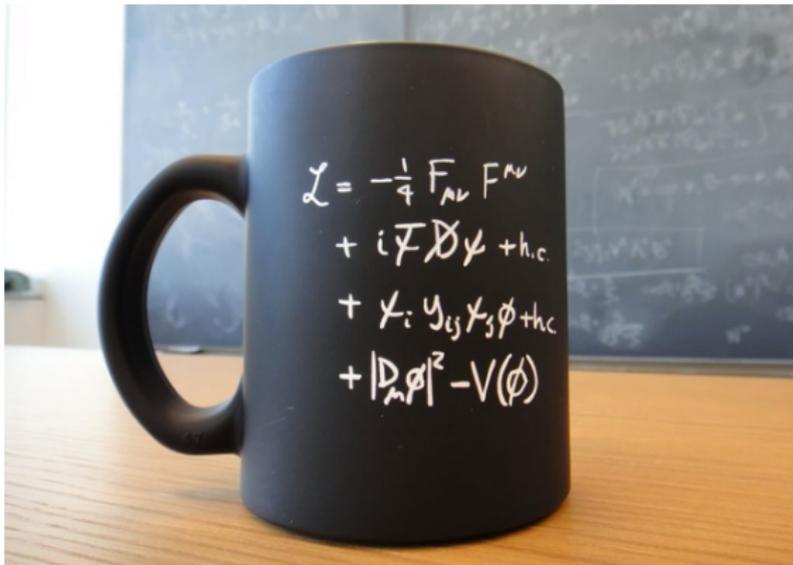
- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$
- Lokale Eichsymmetrie bedingt zusätzliche bosonische Felder = Wechselwirkungen:
  - Fordere Invarianz unter lokaler Phasentransformation  $\psi' = \psi \cdot e^{i\chi(\vec{x}, t)}$   
(analog zu QM:  $|\psi|^2 = |\psi'|^2$ )
  - Problem: **Freie** Dirac-Glg  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - \frac{mc}{\hbar}) \psi = 0$  nicht invariant!
  - Um Forderung zu erfüllen: "minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung
 
$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu$$
 mit Eichtransformation  $A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$ 
 $\Rightarrow$  Eichfeld  $A_\mu$  (Photon) vorhergesagt, mit Kopplung an elektrisch geladenes Fermion, und auch eichinvariantem kinetischen Term:
 
$$\mathcal{L}_{\text{em}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
 mit  $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$

## Mathematischer Aufbau des Standardmodells

(Quanten-)Eichfeldtheorie am Beispiel des Elektromagnetismus

- Materieteilchen = fermionische Felder  $\psi(\vec{x}, t)$
- Lokale Eichsymmetrie bedingt zusätzliche bosonische Felder = Wechselwirkungen:
  - Fordere Invarianz unter lokaler Phasentransformation  $\psi' = \psi \cdot e^{i\chi(\vec{x}, t)}$   
(analog zu QM:  $|\psi|^2 = |\psi'|^2$ )
  - Problem: **Freie** Dirac-Glg  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - \frac{mc}{\hbar}) \psi = 0$  nicht invariant!
  - Um Forderung zu erfüllen: "minimale Kopplung" durch kovariante Ableitung
 
$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu := \partial_\mu + \frac{iq}{\hbar} A_\mu$$
 mit Eichtransformation  $A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \chi(\vec{x}, t)$   
 $\Rightarrow$  Eichfeld  $A_\mu$  (Photon) vorhergesagt, mit Kopplung an elektrisch geladenes Fermion, und auch eichinvariantem kinetischen Term:  
 $\mathcal{L}_{em} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$  mit  $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$
- Ähnlicher (aber komplizierterer) Mechanismus für starke und schwache Wechselwirkung

## Nochmal als Lagrangedichte



- Bisher: Zeile 1 (Bosonen) + Zeile 2 (Fermionen, minimale Kopplung)
- Was verbirgt sich hinter " $\phi$ " und Zeile 3+4?

## Nochmal als Lagrangedichte



- Bisher: Zeile 1 (Bosonen) + Zeile 2 (Fermionen, minimale Kopplung)
- Was verbirgt sich hinter " $\phi$ " und Zeile 3+4?

## Ein massives Problem

- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau$ , quarks) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Ein massives Problem

- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau$ , quarks) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Higgs-Mechanismus

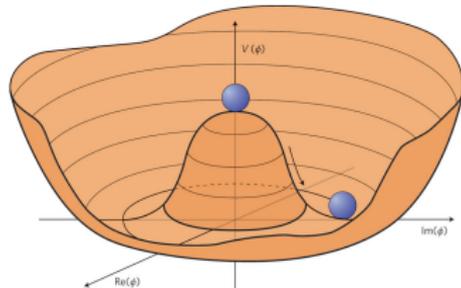
- Angenommen, wir hätten ein weiteres Feld  $\phi$
- Verhält sich als (komplexes) Doublet unter schwacher Isospin-Symmetrie:  $\phi = (\Phi_1, \Phi_2)$

## Ein massives Problem

- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau, \text{quarks}$ ) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Higgs-Mechanismus

- Angenommen, wir hätten ein weiteres Feld  $\phi$
- Verhält sich als (komplexes) Doublet unter schwacher Isospin-Symmetrie:  $\phi = (\Phi_1, \Phi_2)$
- Potentialterm  $V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$
- Spontane Symmetriebrechung durch Auswahl eines Vakuums im "Sombbrero"-Rand:  
 $\phi_0 = (0, v/\sqrt{2})$

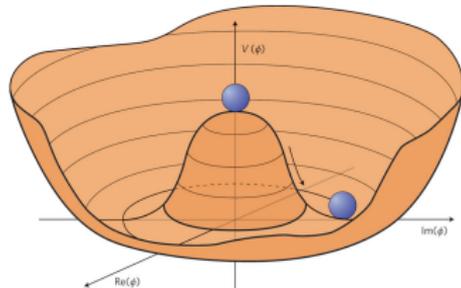


## Ein massives Problem

- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau, \text{quarks}$ ) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Higgs-Mechanismus

- Angenommen, wir hätten ein weiteres Feld  $\phi$
  - Verhält sich als (komplexes) Doublet unter schwacher Isospin-Symmetrie:  $\phi = (\Phi_1, \Phi_2)$
  - Potentialterm  $V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$
  - Spontane Symmetriebrechung durch Auswahl eines Vakuums im "Sombbrero"-Rand:  
 $\phi_0 = (0, v/\sqrt{2})$
- eichinvariante Masseterme für Fermionen:  
 $\mathcal{L} \sim y_{ij} \phi \bar{\psi}_L \psi_R + h.c.$

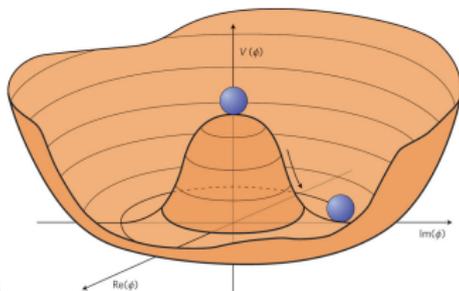


## Ein massives Problem

- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau, \text{quarks}$ ) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Higgs-Mechanismus

- Angenommen, wir hätten ein weiteres Feld  $\phi$
  - Verhält sich als (komplexes) Doublet unter schwacher Isospin-Symmetrie:  $\phi = (\Phi_1, \Phi_2)$
  - Potentialterm  $V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$
  - Spontane Symmetriebrechung durch Auswahl eines Vakuums im "Sombbrero"-Rand:  
 $\phi_0 = (0, v/\sqrt{2})$
- eichinvariante Masseterme für Fermionen:  
 $\mathcal{L} \sim y_{ij} \phi \bar{\psi}_L \psi_R + h.c.$
- eichinvariante Masseterme für Bosonen aus Kopplung mit kovarianter Ableitung  $\mathcal{L} \sim |D_\mu \phi|^2$

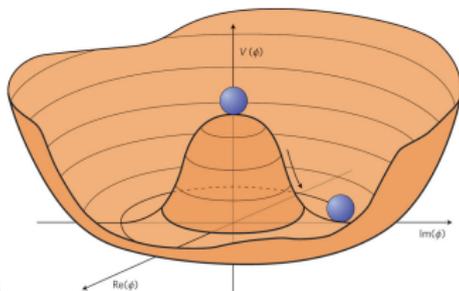


## Ein massives Problem

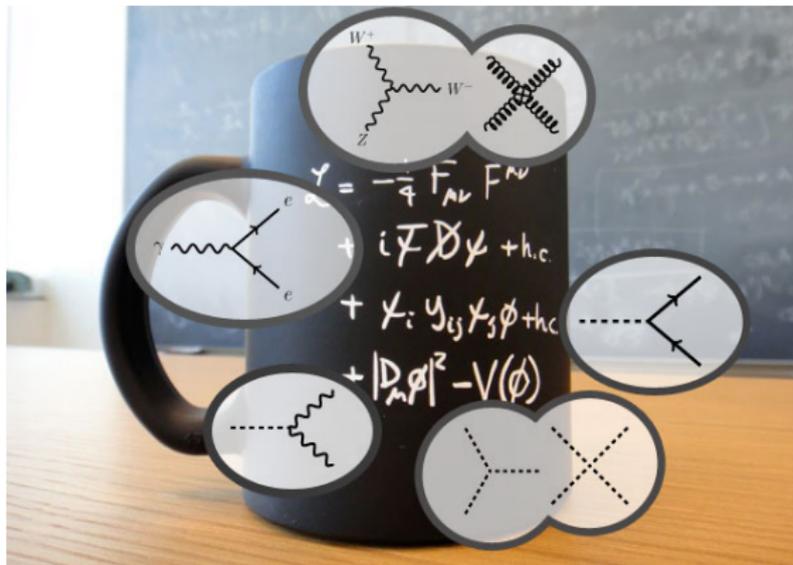
- Bisher gibt es keine Massenterme für Fermionen und Bosonen
- Naive Massenterme a la  $\mathcal{L} \sim m_A^2 A_\mu A^\mu + m_f \bar{\psi}_L \psi_R$  sind **nicht eichinvariant**
- **Experimentell** finden wir jedoch Massen von Fermionen ( $e, \mu, \tau, \text{quarks}$ ) und schwachen Eichbosonen ( $W^\pm, Z^0$ )!

## Higgs-Mechanismus

- Angenommen, wir hätten ein weiteres Feld  $\phi$
  - Verhält sich als (komplexes) Doublet unter schwacher Isospin-Symmetrie:  $\phi = (\Phi_1, \Phi_2)$
  - Potentialterm  $V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$
  - Spontane Symmetriebrechung durch Auswahl eines Vakuums im "Sombbrero"-Rand:  
 $\phi_0 = (0, v/\sqrt{2})$
- eichinvariante Masseterme für Fermionen:  
 $\mathcal{L} \sim y_{ij} \phi \bar{\psi}_L \psi_R + h.c.$
- eichinvariante Masseterme für Bosonen aus Kopplung mit kovarianter Ableitung  $\mathcal{L} \sim |D_\mu \phi|^2$
- 1 verbleibender Freiheitsgrad = neues **skalares massives Teilchen**: Higgs-Boson!

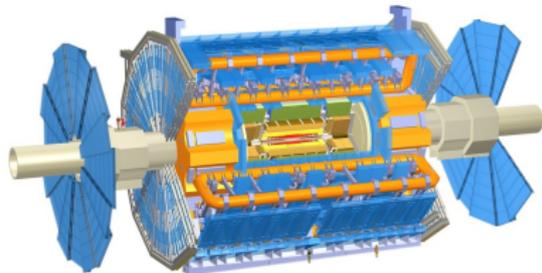


## Zurück zur Lagrangedichte



- Zeile 1 (Bosonen) + Zeile 2 (Fermionen, minimale Kopplung)
- Zeile 3: fermionische Massenterme
- Zeile 4: Higgodynamik und bosonische Massenterme

## Zwei experimentelle Zutaten für die Higgs-Suche Large Hadron Collider und ATLAS-Detektor





- CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist größtes Forschungszentrum der Teilchenphysik
- 21 Mitgliedsstaaten, 3000 Mitarbeiter, 10000 Gastwissenschaftler
- Vor 60 Jahren für Forschung in Nachkriegseuropa gegründet
- Seitdem viele Beschleuniger, Experimente, und mehrere Nobelpreise
- Momentanes Aushängeschild: Large Hadron Collider (LHC)

## Designkriterien

- Entdeckung eines Higgs-Bosons bis ca. 1 TeV Masse
- Verwendung des alten LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-amerikanischen Beschleunigern (Tevatron, SSC in Planung)

→ Proton-Proton-Beschleuniger mit supraleitenden Führungsmagneten für hohe Kollisionsrate und hohe Strahlenergie

## Eigenschaften

- Gesamtenergie zweier Protonen bei der Kollision:  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
- 1232 supraleitende Dipolmagnete,  $l = 13 \text{ m}$ ,  $m = 22 \text{ t}$ ,  $B = 8 \text{ T}$
- Betriebstemperatur: 1.9 K, gekühlt durch Flüssighelium (36800 t kalte Masse)
- Ultrahochvakuum:  $3 \cdot 10^6 \text{ Molek./cm}^3$  ( $\sim$ Weltall)

## Designkriterien

- Entdeckung eines Higgs-Bosons bis ca. 1 TeV Masse
- Verwendung des alten LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-amerikanischen Beschleunigern (Tevatron, SSC in Planung)

→ Proton-Proton-Beschleuniger mit supraleitenden Führungsmagneten für hohe Kollisionsrate und hohe Strahlenergie

## Eigenschaften

- Gesamtenergie zweier Protonen bei der Kollision:  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
- 1232 supraleitende Dipolmagnete,  
 $l = 13 \text{ m}$ ,  $m = 22 \text{ t}$ ,  $B = 8 \text{ T}$
- Betriebstemperatur: 1.9 K, gekühlt durch Flüssighelium (36800 t kalte Masse)
- Ultrahochvakuum:  $3 \cdot 10^6 \text{ Molek./cm}^3$  ( $\sim$ Weltall)
- Pro Strahl 2808 Pakete mit je  $10^{11}$  Protonen  
→ 360 MJ pro Strahl (= 400 t ICE bei 150 km/h)

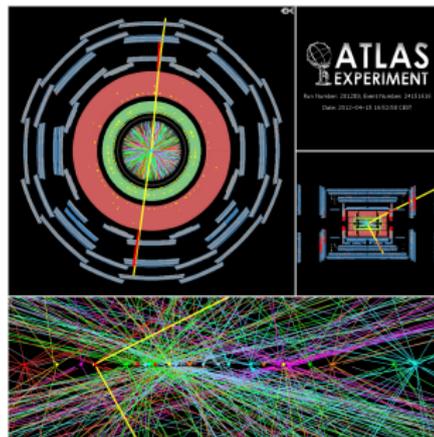
## Designkriterien

- Entdeckung eines Higgs-Bosons bis ca. 1 TeV Masse
- Verwendung des alten LEP-Tunnels (27 km)
- Konkurrenz zu US-amerikanischen Beschleunigern (Tevatron, SSC in Planung)

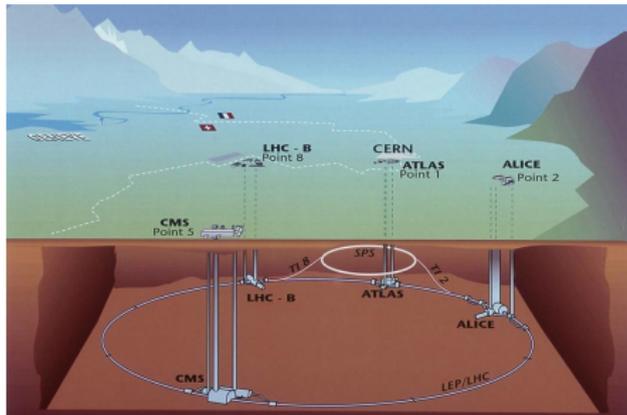
→ **Proton-Proton-Beschleuniger** mit supraleitenden Führungsmagneten für hohe Kollisionsrate und hohe Strahlenergie

## Eigenschaften

- Gesamtenergie zweier Protonen bei der Kollision:  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
- 1232 supraleitende Dipolmagnete,  $l = 13 \text{ m}$ ,  $m = 22 \text{ t}$ ,  $B = 8 \text{ T}$
- Betriebstemperatur: 1.9 K, gekühlt durch Flüssighelium (36800 t kalte Masse)
- Ultrahochvakuum:  $3 \cdot 10^6 \text{ Molek./cm}^3$  ( $\sim$ Weltall)
- Pro Strahl 2808 Pakete mit je  $10^{11}$  Protonen  
→ 360 MJ pro Strahl (= 400 t ICE bei 150 km/h)
- Crossing-Rate  $\approx 31 \text{ MHz}$ , je  $\approx 19$  Kollisionen  
→ 600M (inelastische) Kollisionen pro Sekunde!



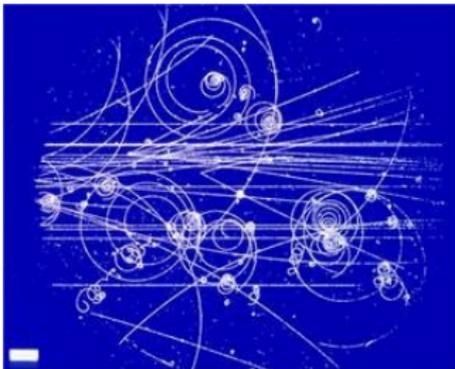
Herausforderung: 1 interessantes Ereignis in  $10^{13}$  uninteressanten!



- Tunnel in durchschnittlich 100 m Tiefe
- Unterhalb der Grenze Schweiz/Frankreich
- 4 Kollisionspunkte mit Teilchendetektoren

## Wie weist man Elementarteilchen nach?

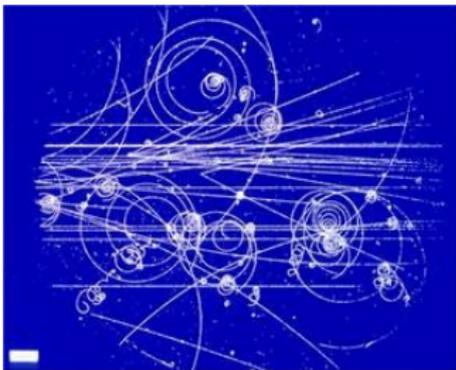
Historisch: Bildgebende Detektoren



- Sichtbare Teilchenspuren in Nebelkammer/Blasenkammer
- Manuelle Ausmessung der Krümmungsradien für Impulsmessung  
→ zu langsam für 600 MHz

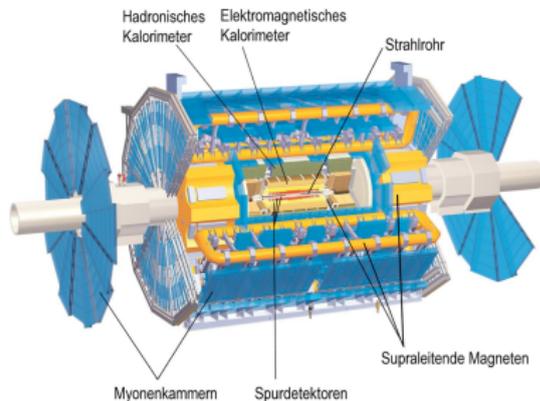
## Wie weist man Elementarteilchen nach?

Historisch: Bildgebende Detektoren



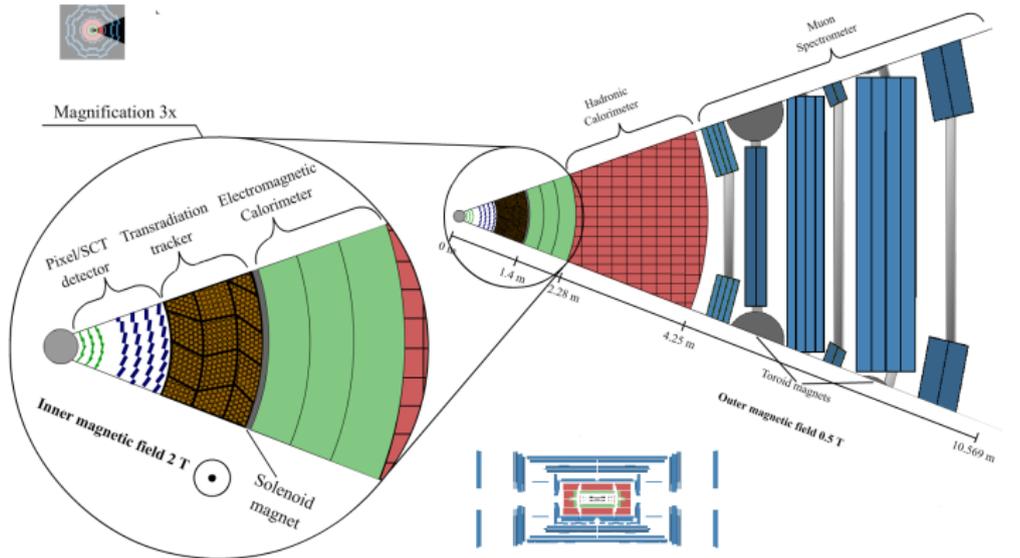
- Sichtbare Teilchenspuren in Nebelkammer/Blasenkammer
- Manuelle Ausmessung der Krümmungsradien für Impulsmessung  
→ zu langsam für 600 MHz

Elektronische Detektoren, z.B. ATLAS



- Messung elektrischer Signale
- Auswertung mit komplexen Software-Algorithmen
- Zwiebelförmige Struktur für Messung verschiedener Teilchenarten

## Querschnitt des ATLAS-Detektors



## Die ATLAS-Kollaboration

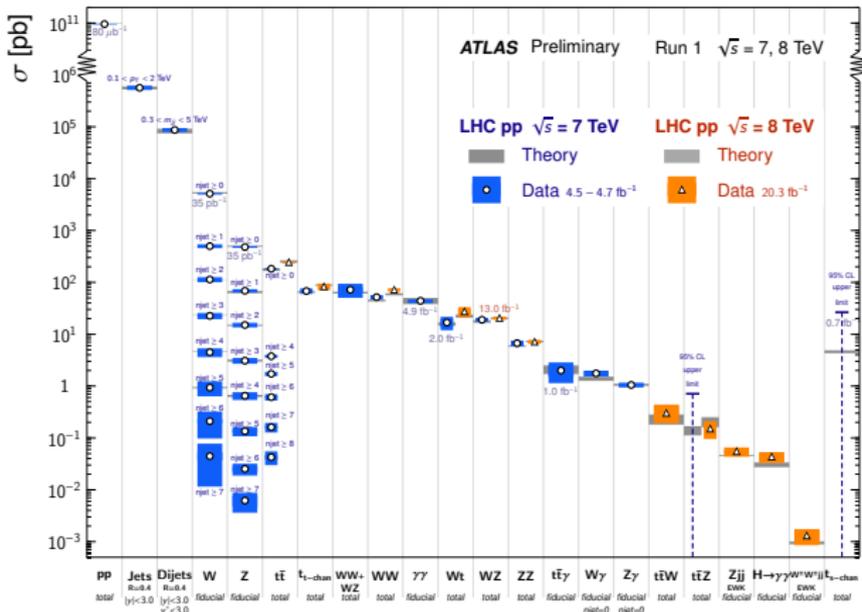


38 Länder  
175 Institute  
3000 Physiker

# Standardmodell-Messungen mit ATLAS

**Standard Model Production Cross Section Measurements**

Status: July 2014



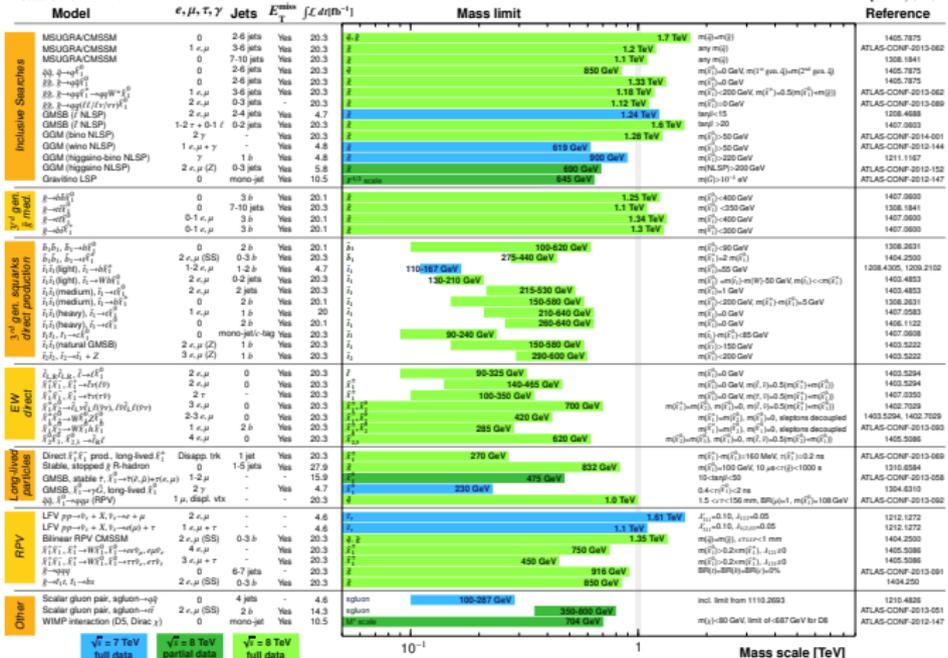
## Suchen nach "neuer Physik"

### ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: ICHEP 2014

### ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 $\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

# Suchen nach "neuer Physik"

**ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Exclusion**

Status: ICHEP 2014

**ATLAS Preliminary**

$$\int \mathcal{L} dt = (1.0 - 20.3) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$

	Model	$\ell, \gamma$	Jets	$E_{miss}^{\gamma}$	$\int \mathcal{L} d\Omega [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference
Extra dimensions	ADD $G_{\mu\kappa} + g/q$	-	1-2j	Yes	4.7	$M_{\text{Pl}}$ 4.37 TeV	n = 2 1210.4491
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 5.2 TeV	n = 3 HLZ ATLAS-CONF-2014-030
	ADD GBH $\rightarrow \ell\gamma$	$1e, \mu$	1j	-	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 5.2 TeV	1311.2036 n = 6
	ADD GBH	-	2j	-	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 6.2 TeV	to be submitted to PRD
	ADD BH High $N_{\text{eff}}$	$2\mu$ (SS)	-	-	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 6.2 TeV	1326.4375 n = 6, $M_{\text{Pl}} = 1.5 \text{ TeV}$ , non-res BH
	ADD BH High $\Sigma p_T$	$\geq 1e, \mu$	$\geq 2j$	-	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 6.2 TeV	1405.4254
	RS1 $G_{\mu\kappa} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$G_{\mu\kappa}$ mass 2.6 TeV	1425.4123
	RS1 $G_{\mu\kappa} \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	$2e, \mu$	-	Yes	4.7	$G_{\mu\kappa}$ mass 1.23 TeV	$k/M_{\text{Pl}} = 0.1$ 1208.2880
	Bulk RS $G_{\mu\kappa} \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\gamma\gamma$	$2e, \mu$	2j/1j	-	20.3	$G_{\mu\kappa}$ mass 790 GeV	$k/M_{\text{Pl}} = 1.0$ ATLAS-CONF-2014-039
	Bulk RS $G_{\mu\kappa} \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	$1e, \mu$	$\geq 4b$	-	19.5	$G_{\mu\kappa}$ mass 590-710 GeV	$k/M_{\text{Pl}} = 1.0$ ATLAS-CONF-2014-055
	Bulk RS $G_{\mu\kappa} \rightarrow \tau\tau$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1Qj$	Yes	14.3	$G_{\mu\kappa}$ mass 2.8 TeV	BR = 0.025 ATLAS-CONF-2013-052
	$S^1/Z_2$ ED	$2e, \mu$	-	-	5.0	$M_{\text{KK}} \times R^{-1}$ 4.71 TeV	1209.2535
UED	$2\gamma$	-	Yes	4.8	Compact scale $R^{-1}$ 1.41 TeV	ATLAS-CONF-2012-072	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$Z'$ mass 2.8 TeV	1425.4123
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	$2\tau$	-	-	19.5	$Z'$ mass 1.8 TeV	ATLAS-CONF-2013-066
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1e, \mu$	-	Yes	20.3	$W'$ mass 1.26 TeV	ATLAS-CONF-2014-017
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow \ell\nu\ell'\ell'$	$3e, \mu$	-	Yes	20.3	$W'$ mass 1.32 TeV	1406.4456
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow q\bar{q}\ell'\ell'$	$2e, \mu$	2j/1j	-	20.3	$W'$ mass 1.39 TeV	ATLAS-CONF-2014-039
	LRSM $W'_2 \rightarrow \ell\bar{\nu}$	$1e, \mu$	2b, 0-1j	Yes	14.3	$W'_2$ mass 1.46 TeV	ATLAS-CONF-2013-055
LRSM $W'_2 \rightarrow \ell\bar{b}$	$0e, \mu$	$\geq 1b, 1j$	-	20.3	$W'_2$ mass 1.77 TeV	to be submitted to EPJG	
CI	CI $e\bar{e}e\bar{e}$	-	2j	-	4.8	A 7.6 TeV	$q = +1$ 1216.1718
	CI $q\bar{q}q\bar{q}$	$2e, \mu$	-	-	20.3	A 3.3 TeV	$q = -1$ ATLAS-CONF-2014-030
	CI $q\bar{u}u\bar{q}$	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	14.3	A 3.3 TeV	$ C  = 1$ ATLAS-CONF-2013-051
DM	EFT D5 operator (Dirac)	$0e, \mu$	1-2j	Yes	10.5	$M_{\text{Pl}}$ 721 GeV	at 90% CL for $m(\chi) < 80 \text{ GeV}$ ATLAS-CONF-2013-147
	EFT D9 operator (Dirac)	$0e, \mu$	1, $\geq 1j$	Yes	20.3	$M_{\text{Pl}}$ 2.4 TeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1309.4917
LO	Scalar $LQ$ 1 <sup>st</sup> gen	$2e$	$\geq 2j$	-	1.0	LO mass 660 GeV	$\beta = 1$ 1112.4628
	Scalar $LQ$ 2 <sup>nd</sup> gen	$2\mu$	$\geq 2j$	-	1.0	LO mass 665 GeV	$\beta = 1$ 1203.3172
	Scalar $LQ$ 3 <sup>rd</sup> gen	$1e, \mu, 1\tau$	1b, 1j	-	4.7	LO mass 534 GeV	$\beta = 1$ 1303.0526
Heavy quarks	Vector-like quark $TT \rightarrow Ht + X$	$1e, \mu$	$\geq 2b, \geq 4j$	Yes	14.3	T mass 790 GeV	T in (TB) doublet ATLAS-CONF-2013-018
	Vector-like quark $TT \rightarrow Wb + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	14.3	T mass 670 GeV	isospin singlet ATLAS-CONF-2013-026
	Vector-like quark $TT \rightarrow Zt + X$	$2\mu, 3e, \mu$	$\geq 0\bar{t}b$	-	20.3	T mass 739 GeV	T in (TB) doublet ATLAS-CONF-2014-036
	Vector-like quark $BB \rightarrow Zb + X$	$2\mu, 3e, \mu$	$\geq 0\bar{t}b$	-	20.3	B mass 796 GeV	B in (TB) doublet ATLAS-CONF-2014-036
	Vector-like quark $BB \rightarrow Wt + X$	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	14.3	B mass 796 GeV	B in (TB) doublet ATLAS-CONF-2013-051
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	$1\gamma$	1j	-	20.3	$q^*$ mass 3.3 TeV	only $u'$ and $d'$ , A: $m(\ell')$ 1309.3230
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	2j	-	20.3	$q^*$ mass 4.06 TeV	only $u'$ and $d'$ , A: $m(\ell')$ to be submitted to PRD
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	$1\mu, 2e, \mu, 1b, 2j$ or $1\tau$	Yes	4.7	$b^*$ mass 870 GeV	left-handed coupling 1301.1383	
	Excited lepton $\ell^* \rightarrow \ell\gamma$	$2e, \mu, 1\gamma$	-	-	13.0	$\ell^*$ mass 3.2 TeV	A: $\geq 2.2 \text{ TeV}$ 1308.1364
Other	LSTC $e\bar{\nu} \rightarrow W\gamma$	$1e, \mu, 1\gamma$	-	Yes	20.3	$W$ mass 660 GeV	to be submitted to PLB 1203.5420
	LRSM Majorana $\nu$	$2e, \mu$	2j	-	2.1	$\bar{\nu}\bar{\nu}$ mass 1.3 TeV	$m(W_2) = 2 \text{ TeV}$ , no mixing ATLAS-CONF-2013-019
	Type II Seesaw	$2e, \mu$	-	-	5.8	$\bar{\nu}\bar{\nu}$ mass 365 GeV	$(V_2)_0 = 0.95,  V_2  = 0.03, (V_2)_3 = 0$ 1201.5676
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$ (SS)	-	-	4.7	$H^{\pm\pm}$ mass 409 GeV	DV production, BR( $H^{\pm\pm} \rightarrow \tau\tau$ ) = 1 1301.5372
	Multi-charged particles	-	-	-	4.4	Multi-charged particle mass 490 GeV	DV production, $ \xi  = 4\mu$ 1207.5411
	Magnetic monopoles	-	-	-	2.0	Monopole mass 862 GeV	DV production, $ \xi  = 1/2g$

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$

$$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$$

 $10^{-1}$ 

1

 $10$ 

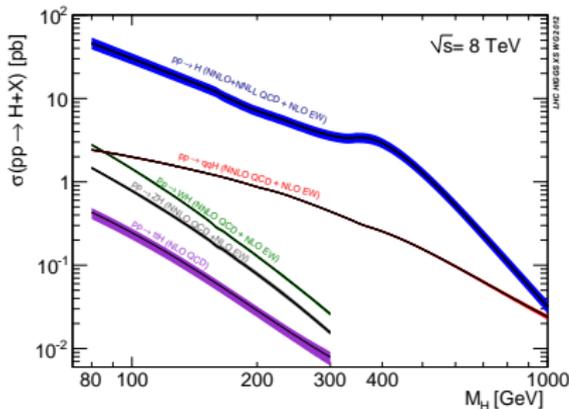
Mass scale [TeV]

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

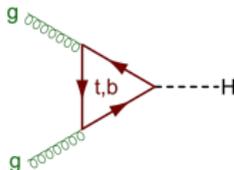
## Wie entdeckt man ein Higgs-Boson?

- Kopplungsstärke der Higgs-Bosonen proportional zu Teilchenmasse  
→ v.a. an schwere Quarks ( $t$  und  $b$ ) und schwache Eichbosonen ( $W$ ,  $Z$ )

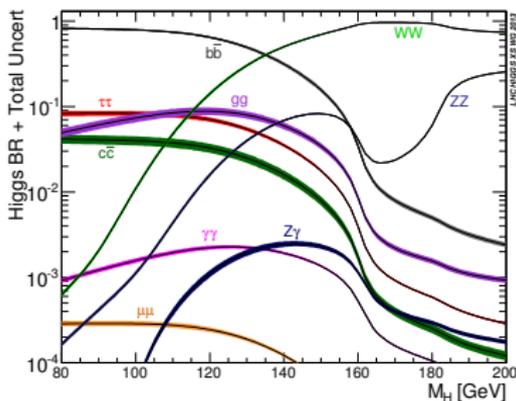
Produktionsprozesse



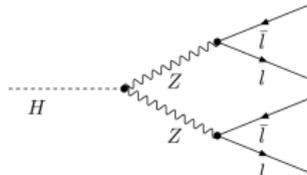
Dominiert durch Gluon-Gluon-Fusion:



Zerfälle

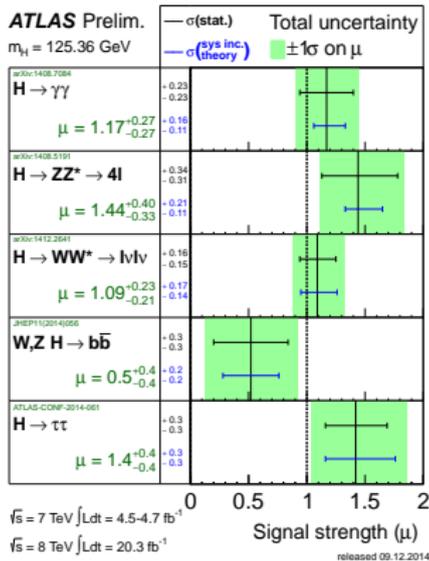
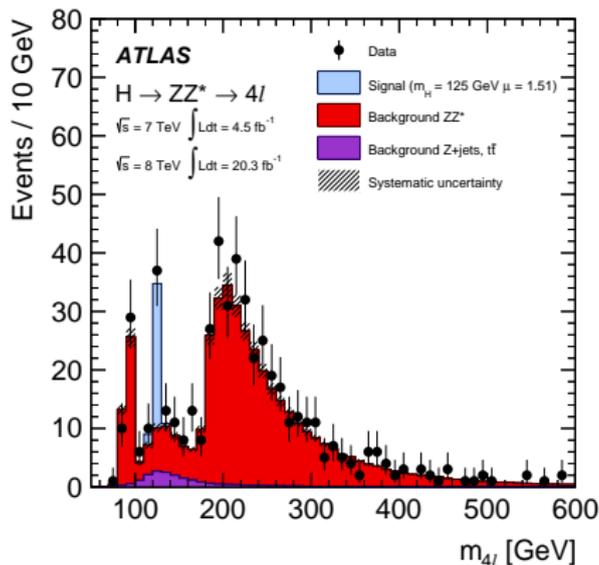


Sehr "sauberer" Kanal:



## Higgs-Messungen mit Daten aus 2011-2012

## Higgs-Messungen mit Daten aus 2011-2012



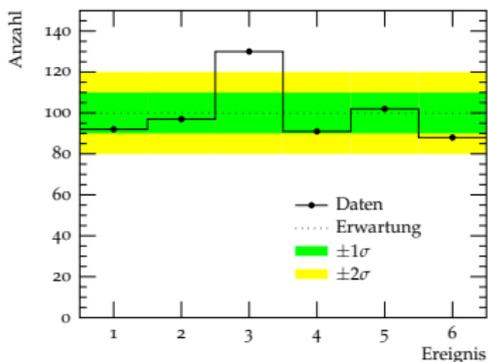
**NB: Theorievorhersagen für Signal- und Untergrundprozesse**

## Präzise Theorievorhersagen



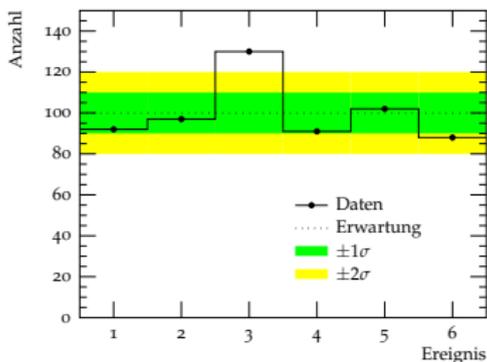
## Analogie: Ist der Würfel manipuliert?

- Experiment: 600 Würfel
- Theorievorhersage:  $N_i = 100$



## Analogie: Ist der Würfel manipuliert?

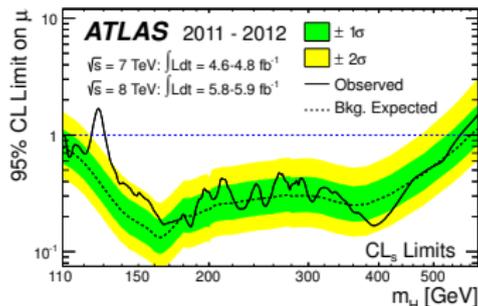
- Experiment: 600 Würfel
- Theorievorhersage:  $N_i = 100$



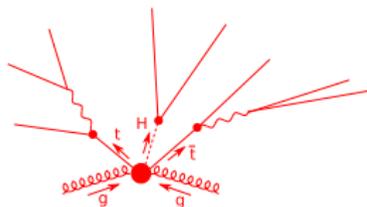
## Teilchenphysik: Existiert das Higgs-Boson?

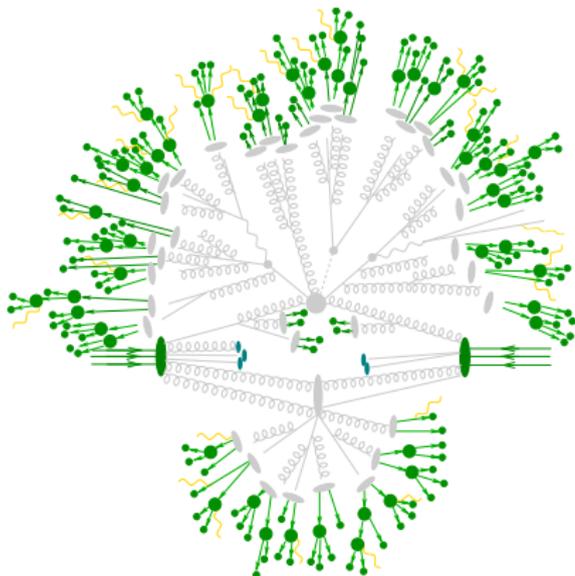
- Experiment: LHC-Kollisionsereignisse auf interessante Observablen projiziert
- Theorievorhersage mit/ohne Higgs: ?  
Nicht analytisch berechenbar!

⇒ Verwendung von Monte-Carlo-Programmen für stochastische Simulation der Theoriehypothese

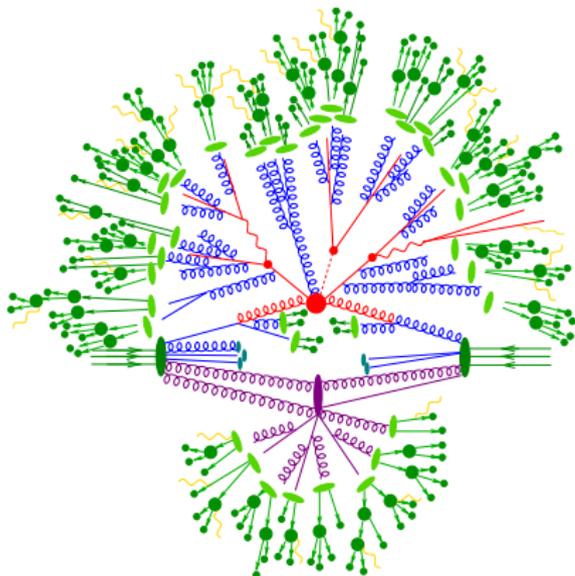


- Theoretisch interessiert uns:  
**Fundamentale** Physik! ( $gg \rightarrow t\bar{t}H$ )

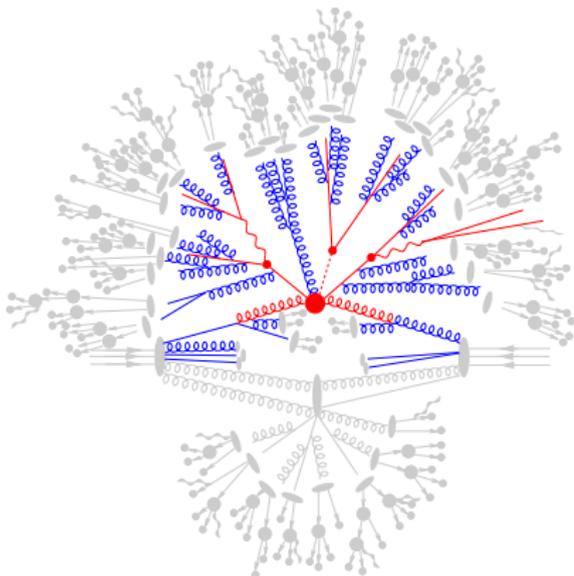




- Theoretisch interessiert uns:  
**Fundamentale** Physik! ( $gg \rightarrow t\bar{t}H$ )
- Aber experimentell:  
 $pp \rightarrow$  **Hadronen**  
Dynamik durch QCD bestimmt!

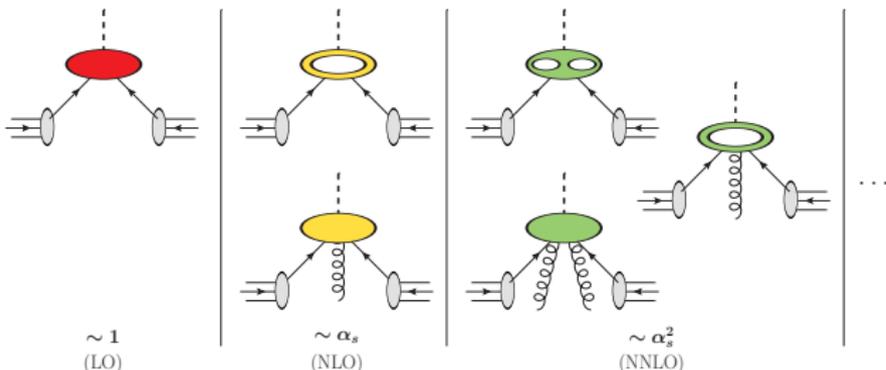


- Theoretisch interessiert uns:  
**Fundamentale** Physik! ( $gg \rightarrow t\bar{t}H$ )
- Aber experimentell:  
 $pp \rightarrow$  **Hadronen**  
Dynamik durch QCD bestimmt!
- Verbindung:  
Monte-Carlo Ereignisgeneratoren



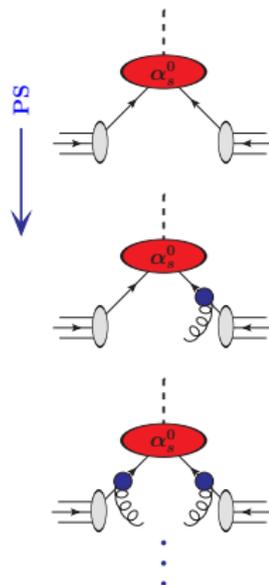
- Theoretisch interessiert uns:  
**Fundamentale** Physik! ( $gg \rightarrow t\bar{t}H$ )
- Aber experimentell:  
 $pp \rightarrow$  **Hadronen**  
Dynamik durch QCD bestimmt!
- Verbindung:  
Monte-Carlo Ereignisgeneratoren
- Mein Schwerpunkt:  
Perturbative QCD
  - **Matrix Element**  
Feste Ordnung in  
Störungstheorie
  - **Parton Shower**  
Genäherte Resummation

- Exakte Berechnung von  $gg \rightarrow t\bar{t}H$  nicht möglich
- Nur Störungsreihe in  $\alpha_s$  (a la Feynman):

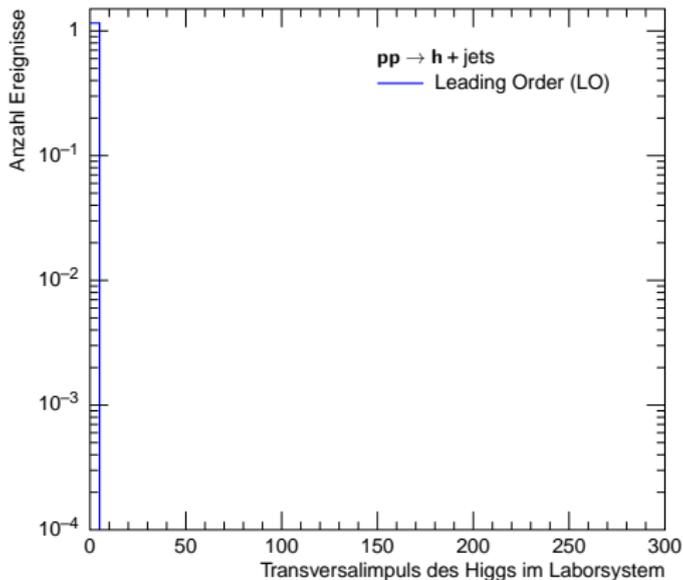
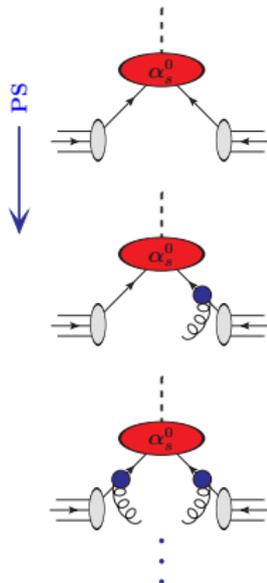


- Für Vorhersagen auf **Hadronenniveau**: Keine Konvergenz!
- Resummation der Reihe notwendig
- Limitation durch enorme Komplexität!
  - Näherung: Resummiere nur universelle große Beiträge jeder Ordnung
- Konkret in unserem Fall: **Parton Shower (PS)**  
= QCD-Bremstrahlung entsprechend der großen Beiträge

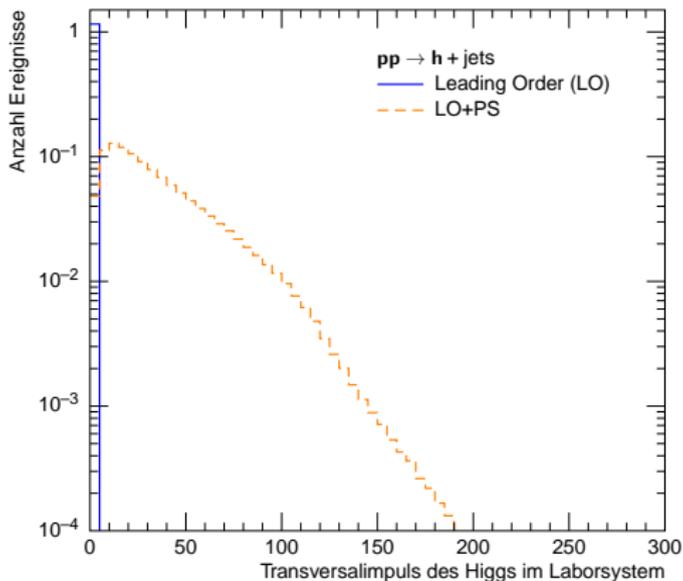
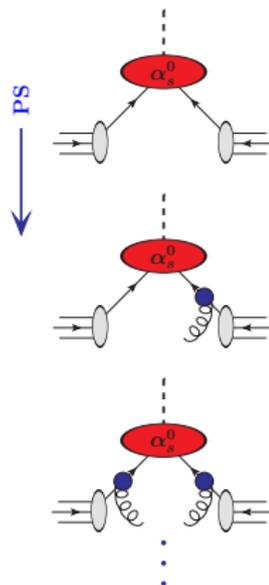
## Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



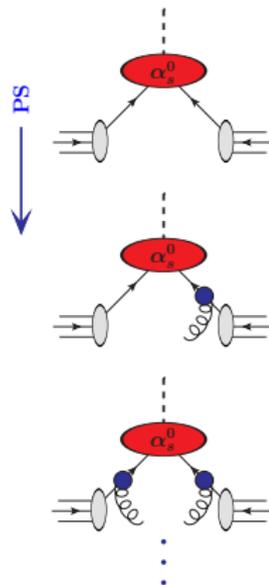
## Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



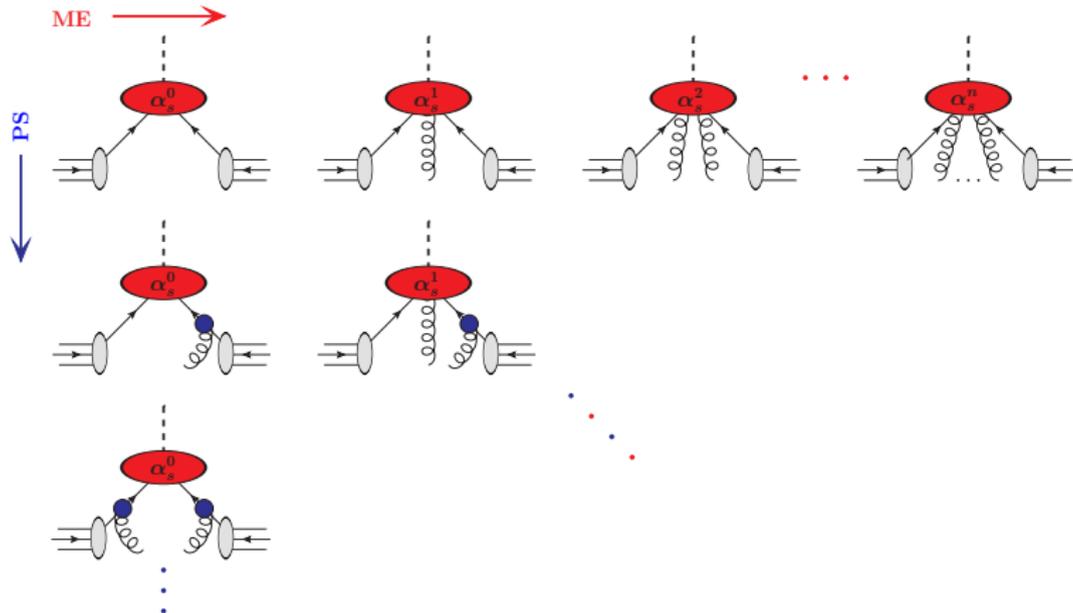
## Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



## “ME+PS@LO Merging”

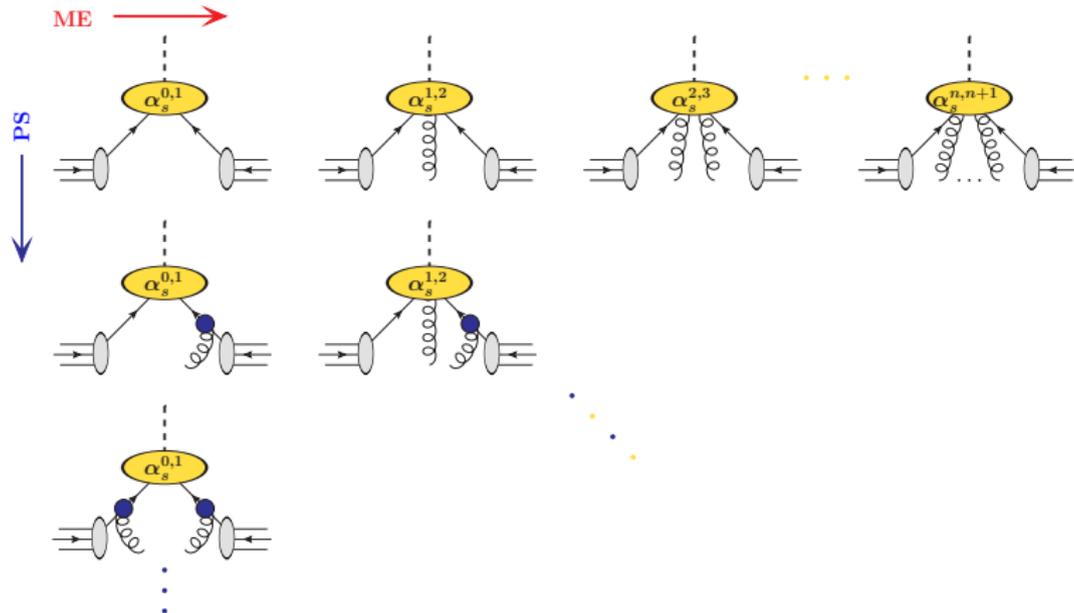


## “ME+PS@LO Merging”

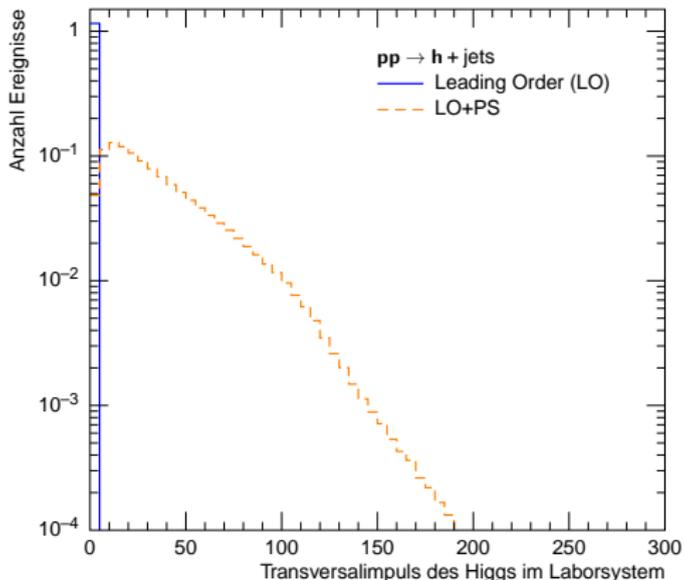


Catani, Krauss, Kuhn, Webber (2001)  
Höche, Krauss, Schumann, FS (2009)

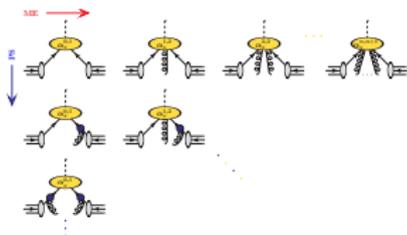
## “ME+PS@NLO Merging”



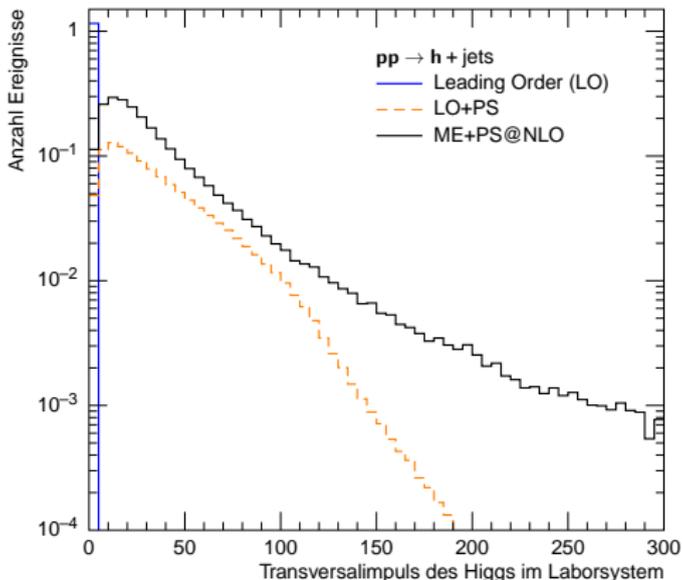
## Beispiel: $pp \rightarrow h + \text{jets}$



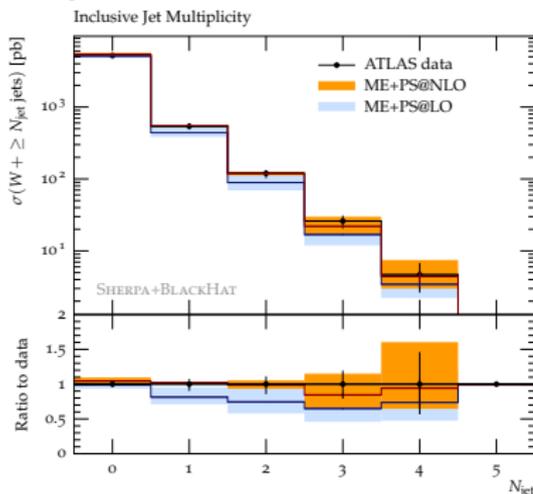
## Beispiel: $pp \rightarrow h+jets$



$pp \rightarrow h+jets$  Vorhersage  
in höchster Präzision



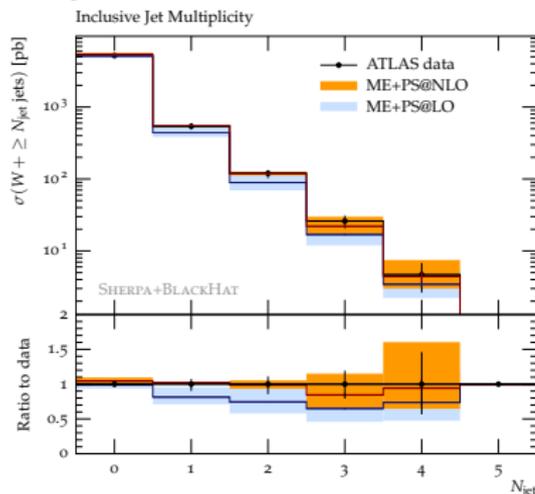
## W+jets



- Vergleich mit ATLAS-Messung  
[Phys.Rev. D85 \(2012\), 092002](#)
- Übereinstimmung mit Daten verbessert
- Signifikante Verringerung der Unsicherheiten im "NLO"-Bereich

[Höche, Krauss, Schönherr, FS \(2012\)](#)

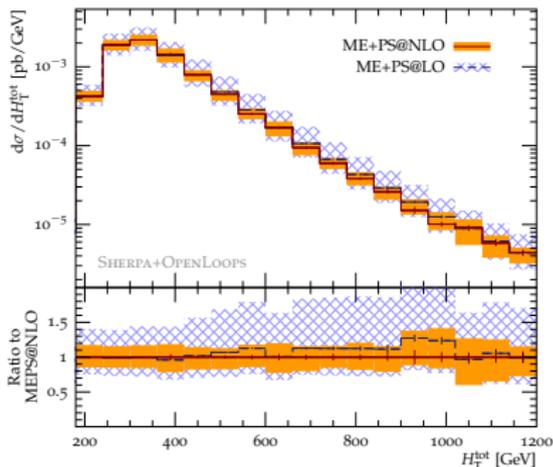
## W+jets



- Vergleich mit ATLAS-Messung  
*Phys.Rev. D85 (2012), 092002*
- Übereinstimmung mit Daten verbessert
- Signifikante Verringerung der Unsicherheiten im "NLO"-Bereich

Höche, Krauss, Schönherr, FS (2012)

## Top-Quark Paarproduktion



- Erste NLO+PS-Simulation für  $pp \rightarrow t\bar{t} + 2\text{jets}$
- Unsicherheiten in BSM-Suchregion  $H_T^{\text{tot}} > 500$  GeV stark verringert!

Höche, Krauss, Maierhöfer, Schönherr, Pozzorini, FS (2014)



- Das Higgs ist gefunden!
  - Standardmodell  
vollständig beobachtet!
- Ziel erreicht,  
Beschleuniger überflüssig?



- Das Higgs ist gefunden!
  - Standardmodell vollständig beobachtet!
- Ziel erreicht,  
Beschleuniger überflüssig?

## Zukünftige Herausforderungen

- Vermessung des Higgs-Bosons
  - Masse
  - Quantenzahlen
  - Differentielle Wirkungsquerschnitte
- Entdeckung von Physik **jenseits des Standardmodells?**
  - Supersymmetrische Partner
  - Exotische Resonanzen
  - Neue Kopplungsstrukturen



**Höchste Präzision in theoretischen Vorhersagen für Signal und Untergrund notwendig**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Anzeige

Promotion in experimenteller oder theoretischer Hochenergiephysik?  
<http://cern.ch/fsiegert/group.html>

- Folie 3 "The 2008 Nobel Prize in Physics - Popular Information".  
Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 5 Jan 2015.  
<[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2008/popular.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/popular.html)>
- Folie 10 Nature Physics 7, 23 (2011)
- Folie 9+11 <http://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of>
- Folie 15 <http://maps.google.de> (modified)
- Folie 20 Higgs XS working group, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCHXSWG>; Wikimedia
- Folie 31 [http://www.toonpool.com/cartoons/Higgs%20Boson\\_172812](http://www.toonpool.com/cartoons/Higgs%20Boson_172812)
- Weitere ©Netzwerk Teilchenwelt, CERN und ATLAS.